مطالعهٔ آزمایشگاهی تأثیر دیوارهٔ جانبی بر ابعاد گودال آبشستگی در پایین‌دست کالورت★

سید محمدعلی زمردیان(۱) حمیده غفاری(۲) فاطمه ساداتی(۳)

چکیده آبشستگی موضعی در خروجی کالورت پدیده‌ای متداول است؛ لذا ارائهٔ راهکارهای مقابله با این پدیدهٔ مخرب ضروری می‌باشد. در مطالعهٔ حاضر تأثیر دیوارهٔ جانبی پایین‌دست کالورت بر ابعاد گودال آبشستگی موضعی با درنظر گرفتن دیواره‌هایی با زوایای ۱۵، ۳۰، ۴۵، ٦۰ و ۷۵ درجه نسبت به خط مرکزی جریان، در دو تیپ هیدرولیکی ۱ و ٤ و در دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از دیواره با زاویهٔ ۱۵ درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبشستگی و همچنین ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین‌دست می‌شود که میزان کاهش عمق آبشستگی در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ هیدرولیکی به‌میزان ٪۳۵/۳ نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین دیواره با زاویهٔ ۳۰ درجه در مقطع مستطیلی با تیپ ۱، با کاهش ٤٦٪ آبشستگی عملکرد خوبی را نشان داده‌است. دیواره‌های جانبی با زاویهٔ ٦۰ و ۷۵ درجه، عملکرد مناسبی در کاهش آبشستگی نشان ندادند. همچنین در تیپ ۱، دیواره در همهٔ زوایا باعث کاهش عمق آبشستگی شد؛ اما در تیپ ٤ فقط در زاویهٔ ۱۵ درجه عمق آبشستگی به‌میزان ۳۰٪ در مقطع دایره‌ای و ۱۰٪ در مقطع مستطیلی کاهش پیدا کرد. همچنین ابعاد گودال آبشستگی در پایین‌دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد؛ به‌گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱ هیدرولیکی، عمق آبشستگی به‌میزان ۳۵٪ نسبت به مستطیلی افزایش داشته‌است که این در تیپ ٤ هیدرولیکی به‌میزان ۹۵٪ مشاهده شد. همچنین ابعاد گودال آبشستگی در تیپ ۱ نسبت به تیپ ٤ در همهٔ زوایا بیشتر می‌باشد و این در حالی است که ارتفاع رسوب‌گذاری در تیپ ٤ نسبت به تیپ ۱ بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی آبشستگی موضعی، تیپ هیدرولیکی، زاویهٔ دیوارهٔ جانبی.

Experimental Investigation on the Effect of Wing Walls on Scour Hole's Dimensions Downstream of Culvert

S. M. Ali Zomorodian H. Ghaffari F. Sadati

Abstract

Local scour at the culvert outlet is common event. In this study the effect of different angles of wing walls flare on scour in hydraulic conditions for type 1 and 4 flows at downstream of circular and box culvert investigated. Wing walls flare 15, 30, 45, 60 and 75- degrees to the outlet centerline were considered in this study. Result showed 15- degree flare wing walls reduced scour depth, scour length and mound height. So, 15- degree flare wing wall in box culvert and type1 flow reduced scour equal 35.3% to the control test. Also, 30- degree flare wing walls in box culvert and type1 flow has shown a good performance in reducing scour depth equal 46%. Wing walls flare angle 60 and 75- degree, did not have good performance in reducing scour depth at downstream of culverts. In type 1 flow, scour can be reduced by using of wing walls with any angles. In type4 flow, only 15- degree wing walls flare reduced maximum scour depth equal 30% in circular culvert and 10% in box culvert. Also, the dimensions of the scour hole on downstream of the circular culvert is more than box culvert. So, in the circular culvert and type 1, scour depth increased equal 35% compared to box culvert and it was observed equal 95% in type-4 flow. The dimensions of the scour hole in type 1 flow is higher than type 4 at all angles, while the mound height in type 4 is higher than type 1 flow.

Key word Local scour, Hydraulic type, Wing Walls flare

★تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۵/۱۹ تاریخ پذیرش آن ۹۷/۵/٦ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز.

Email: mzomorod@shirazu.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز.

(۳) کارشناس ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه شیراز.

مقدمه

کالورت یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی تقاطعی است که به‌منظور انتقال جریان آب از زیر خاکریز جاده، بزرگراه، راه‌آهن و غیره به‌کار می‌رود و نقش مؤثری در عبور جریان هنگام سیلاب دارد؛ بنابراین می‌توان گفت که کالورت‌ها ساختمآنهایی حفاظتی هستند که هنگام عبور سیلاب و یا هرگونه جریان کنترل‌نشده، از کانال‌ها و سازه‌های وابسته و همچنین خاکریزها حفاظت می‌کنند. در همین راستا طراحی و اجرای دقیق آنها و مدیریت بهره‌برداری و نگه‌داری از آنها ضروری به‌نظر می‌رسد و نقش مؤثری در طول عمر سازه دارد. آبشستگی موضعی در خروجی کالورت پدیده‌ای متداول است و از عوامل تهدیدکنندهٔ پایداری آن می‌باشد که درصورت عدم کنترل و مهار آن، پتانسیل خرابی تمامیت سازه زیربنایی آن را دارد و خسارت زیادی را به‌همراه می‌آورد. در خروجی کالورت به‌دلیل سرعت زیاد، جریان معمولا به‌صورت جت افقی خارج می‌شود، به این صورت که خطوط جریان موازی با بستر می‌باشد. با برخورد جریان خروجی از کالورت به سطح آب پایاب و تغییرات سرعت، الگوی خطوط جریان تغییر می‌کند و باعث افزایش تلاطم جریان و ایجاد جریآنهای ثانویه به‌شکل گرداب (Eddy) در این ناحیه می‌شود که باعث جدا شدن و انتقال ذرات بستر به پایین‌دست و درنتیجه تشکیل گودال آبشستگی در خروجی کالورت می‌شود. رسوبات حمل‌شده در پایین‌دست تجمع پیدا می‌کنند و یک برآمدگی را تشکیل می‌دهند. با گذشت زمان انرژی گرداب‌ها توسط حجم آب درون گودال مستهلک می‌شود و گودال آبشستگی به تعادل می‌رسد. با مرور زمان و تکرار جریان سیلاب عبوری از کالورت و درصورت عدم تمهیدات لازم در این ناحیه این‌گونه آبشستگی به‌سمت بالادست حرکت می‌کند و باعث شسته‌شدن زیر سازه می‌شود و پایداری آن را مختل می‌کند. بنابراین شبیه‌سازی این‌گونه آبشستگی در شرایط مختلف ضرورت دارد تا براساس آن بتوان راهکارهای مناسبی برای کنترل آن ارائه داد و همچنین به مهندسان طراح در پیشگیری از مشکلات آتی کمک نمود. کالورت‌ها اگرچه ازنظر اجرایی ساده هستند اما طرح هیدرولیکی آنها تا حدودی پیچیده می‌باشد و تابعی از عوامل مختلف است که به‌سادگی قابل تقسیم به جریان‌های تحت فشار یا آزاد نمی‌باشد بلکه در برخی موارد ترکیبی از این دو حالت می‌باشد[1]. بنابراین برآورد وضعیت آبشستگی در خروجی کالورت‌ها به‌دلیل تأثیر پارامترهای متعدد دشوار است. چو (۱۹۵۹) جریان درون کالورت را در ٦ تیپ هیدرولیکی دسته‌بندی کرده‌است که در شکل (۱) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است ارتفاع سراب، ارتفاع کالورت، عمق جریان درون مجرا، طول و شیب مجرا از عوامل تعیین‌کنندهٔ نوع جریان درون کالورت می‌باشد. در این شکل H_W ارتفاع آب بالادست و D ارتفاع کالورت است [2]. یو و لی (۲۰۱۲) بیان نمودند که طبقه‌بندی جریان در کالورت طبق سه مشخصه بیان می‌شود. مشخصهٔ اول این است که ورودی کالورت مستغرق است یا خیر، که به‌وسیلهٔ سطح آب بالادست مشخص می‌شود. مشخصهٔ دوم شامل ویژگی‌های جریان درون مجرا است و مشخصهٔ سوم وضعیت جریان در پایین‌دست کالورت می‌باشد [3]. به‌منظور جلوگیری از آبشستگی در پایین‌دست کالورت از حوضچه‌های آرامش، پوشش بتنی و سنگچین استفاده می‌شود اما در مواردی به‌جهت کاهش هزینهٔ احداث و یا در مواردی که کالورت در نواحی دورافتاده باشد و از تبدیل خاکی استفاده شده باشد خروجی آن حفاظت نمی‌شود بنابراین دچار فرسایش و آبشستگی می‌شود. محققان زیادی به مطالعه و بررسی پارامترهای مؤثر در آبشستگی در ناحیهٔ پایین‌دست کالورت پرداخته‌اند ازجمله زونبرگ و همکاران (۲۰۱۲) با بررسی آبشستگی در ناحیهٔ خروجی کالورت‌ها بیان

نمودند که سرعت خروجی شاخص اولیه برای تخمین پتانسیل فرسایش‌پذیری می‌باشد [4]. آبیدا و تونسند (۱۹۹۱) با بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر آبشستگی در پایین‌دست کالورت جعبه‌ای با ٤ سطح مقطع متفاوت و در ٤ نوع رسوب با دانه‌بندی متفاوت نشان دادند که عمق آبشستگی عموما با افزایش نسبت $Q/(WD^{3/2})$ افزایش می‌یابد و علت آن را این‌گونه بیان نمودند که افزایش دبی منجر به افزایش سرعت جریان می‌شود و بنابراین قدرت آبشستگی افزایش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش عرض کالورت (W) و کاهش نسبت B/W، ماکزیمم عمق آبشستگی کاهش می‌یابد و دلیل آن را این‌گونه بیان نمودند که با افزایش عرض کالورت گرداب‌هایی که در مرزهای جانبی جت جریان در حال گسترش هستند عمدتا از طریق برخورد با کنارهٔ کانال از بین می‌روند. B عرض کانال پایین‌دست و Q دبی عبوری از کالورت می‌باشد. آبیدا و تونسند (۱۹۹۱) همچنین با بررسی تأثیر عمق پایاب (y_t) بر میزان آبشستگی، به این نتیجه رسیدند که درصورتی‌که $y_t/D < 0.2$ باشد در این شرایط عمق پایاب کم است و عمق آبشستگی با کاهش عمق پایاب کاهش می‌یابد و اگر $y_t/D>1$ باشد عمق پایاب تأثیر غیرمستقیم بر عمق آبشستگی دارد [5]. ابت و همکاران (۱۹۸۷) با بررسی تأثیر شکل کالورت بر ابعاد آبشستگی در پایین‌دست کالورت با مقطع مربعی، مستطیلی و دایره‌ای، نسبت‌های بی‌بعد ابعاد حفرهٔ آبشستگی را به‌شدت جریان $D.I^*$ $(DI^* = Q/A\,(g\,R_H)^{0.5}$ ارتباط دادند و به این نتیجه رسیدند که شکل کالورت به‌طور قابل‌توجهی هندسهٔ آبشستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد به‌گونه‌ای که ابعاد آبشستگی در هر سه مقطع متفاوت می‌باشد. در این رابطه، A سطح مقطع کالورت، R_H شعاع هیدرولیکی جریان و g شتاب ثقل می‌باشد [6]. ابت و همکاران (۱۹۸٤) با بررسی تأثیر اندازهٔ رسوبات بر پارامترهای آبشستگی در پایین‌دست کالورت رابطهٔ زیر را برای تخمین ابعاد آبشستگی ارائه دادند:

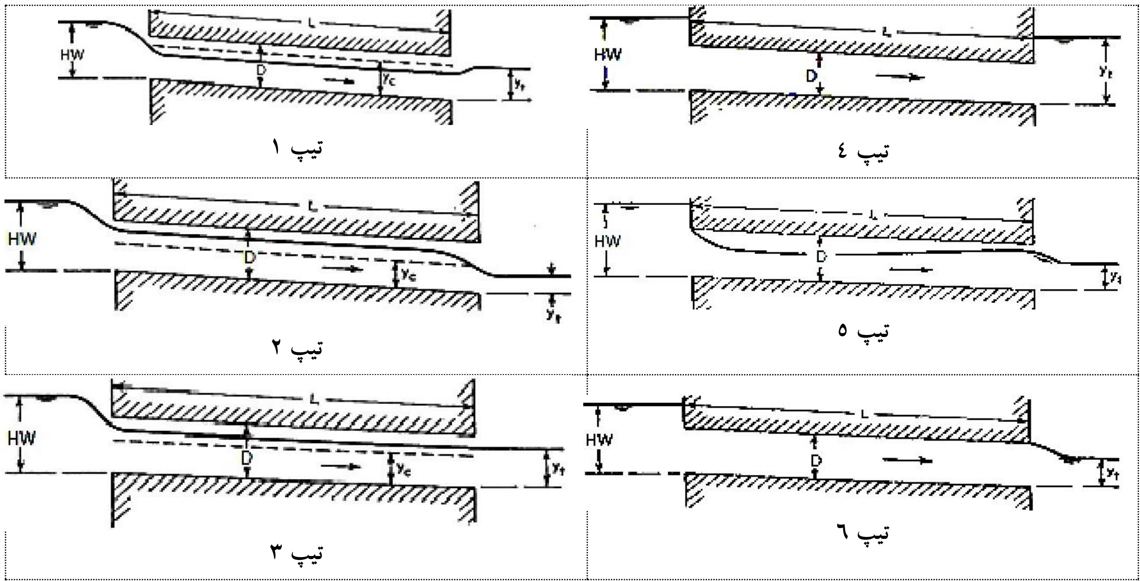
$$y = \frac{a}{\sigma^{0.4}}\left[\left(\frac{Q}{g^{0.5}D^{2.5}}\right)\left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{0.2}\right]^{b} \qquad (1)$$

در این رابطه متغیر y شامل y_S/R_H، W_S/R_H، L_S/R_H و V_S/R_H^3 است و a و b مقادیری ثابت هستند. y_S ماکزیمم عمق آبشستگی، W_S ماکزیمم عرض آبشستگی، L_S ماکزیمم طول آبشستگی، V_S ماکزیمم حجم آبشستگی، σ انحراف معیار ذرات، d_{50} قطر متوسط ذرات می‌باشد [7].

کروکستون و تولیس (۲۰۱۲) به بررسی عملکرد آبشستگی در کالورت با کف فرسایش‌پذیر در شرایط تحت فشار و آزاد پرداختند. آنها یک ضریب اطمینان برای ۸ نوع رسوب ارائه دادند و به این نتیجه رسیدند که زاویه‌دار بودن رسوبات درمقایسه با رسوبات گردگوشه، وسعت آبشستگی را کاهش می‌دهد [8].

علاوه‌بر پارامترهای ذکرشده که توسط محققان بررسی شده‌است زاویهٔ دیوارهٔ جانبی کالورت نیز در میزان آبشستگی در پایین‌دست کالورت مؤثر می‌باشد که به آن کمتر توجه شده‌است. دیواره‌های جانبی در ورودی بالادست و همچنین در خروجی کالورت‌ها به‌عنوان بال هدایتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دیواره‌ها به‌منظور افزایش بازدهی جریان در کالورت، تدریجی نمودن جریان در ورودی و خروجی کالورت، کاهش افت جریان، کمک به پایداری سازه و همچنین حفاظت از خاکریز مجاور به‌کار برده می‌شوند. از دیگر دلایل استفاده از این نوع سازه، اتصال یکپارچهٔ مجرا به سازهٔ انرژی‌گیر پایین‌دست و یا کانال طبیعی می‌باشد. این دیواره‌ها اگر در ورودی کالورت‌های لوله‌ای به‌کار برده شوند تأثیری روی میزان ضریب دبی جریان عبوری نخواهند داشت اما در کالورت‌های جعبه‌ای مؤثر می‌باشند [1]. در استفاده از دیواره‌های جانبی باید دقت شود که این سازه نسبت به خط مرکزی جریان با زاویه‌ای به‌کار برده شود که علاوه

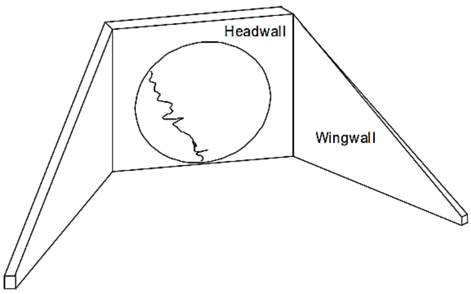
بر اهداف ذکرشده کمترین آشفتگی و جدایی جریان در پایین‌دست کالورت ایجاد نماید و جریان با توزیع یکنواخت‌تری به‌سمت پایین‌دست گسترش یابد. اگر دیوارهٔ جانبی در خروجی کالورت منطبق بر خطوط جریان (Stream Line) باشد آبشستگی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و گرداب‌های (Vortex Shedding) ناشی از تغییرات ناگهانی در گرادیان فشار رفع می‌شوند، به‌عبارت دیگر دیوارهٔ منطبق بر خطوط جریان از جداشدگی جریان جلوگیری می‌کند و به‌این‌ترتیب باعث کاهش آشفتگی جریان می‌شود [9]. ضرایب افت برای انواع زاویهٔ دیوارهٔ جانبی ورودی در جدول (۱) آورده شده‌است. دیواره‌های جانبی زاویه‌دار بسیار کارآمدتر از دیواره‌های جانبی موازی هستند و استفاده از حداقل زاویهٔ عملی دیوارهٔ جانبی این مزیت را دارد که منطقه موردنیاز برای حفاظت در برابر آبشستگی را کاهش دهد [10]. به‌منظور عملکرد بهتر دیواره‌های جانبی باید موازی یا عمود بر خط مرکزی جریان نباشند و از لحاظ هندسی باید مشابه باشند [11]. تصویری از دیوارهٔ جانبی همراه با دیوارهٔ پیشانی در شکل (۲) مشاهده می‌شود. بنابراین باتوجه به پیچیده‌بودن هیدرولیک جریان در کالورت و امکان ایجاد شرایط هیدرولیکی مختلف و به‌تبع آن تأثیر داشتن زاویهٔ دیوارهٔ جانبی در الگوی جریان و مکانیسم آبشستگی در خروجی کالورت، تأثیر هم‌زمان این دو پارامتر بر میزان آبشستگی نیازمند بررسی می‌باشد. همچنین باتوجه به هزینهٔ بالای اجرا و ساخت پوشش حفاظ و همچنین حوضچه‌های آرامش در پایین‌دست این‌گونه سازه‌ها به‌منظور کنترل آبشستگی، تخمین ماکزیمم عمق و طول آبشستگی و همچنین الگوی رسوب‌گذاری در این نواحی به‌منظور حداقل کردن هزینه‌ها ضروری می‌باشد اما تاکنون پژوهشی که به‌طور خاص به بررسی این پارامترها پرداخته باشد صورت نگرفته‌است. در این پژوهش سعی شده‌است با به‌کارگیری تیپ ۱ و ٤ هیدرولیکی در طبقه‌بندی چو (۱۹۵۹)، تأثیر زوایای دیوارهٔ جانبی در پایین‌دست کالورت با دو مقطع دایره‌ای و مستطیلی در کاهش پارامترهای آبشستگی بررسی شود که درادامه به آن پرداخته شده‌است.



شکل ۱ انواع مختلف تیپ‌های هیدرولیکی درون کالورت [2]

جدول ۱ ضریب افت برای انواع دیوارهٔ جانبی ورودی [10]

نوع دیوارهٔ جانبی	ضریب افت
دیواره با زاویهٔ ۳۰ تا ۷۵ درجه	
تاج لبه‌تیز	۰/٤
تاج لبه‌گرد	۰/۲
دیواره با زاویهٔ ۱۰ تا ۲۵ درجه	
تاج لبه‌تیز	۰/۵
بدون دیوارهٔ جانبی	۰/۵
دیوارهٔ جانبی صفر درجه تاج لبه‌تیز	۰/۷



شکل ۲ نمایی از دیوارهٔ جانبی و دیوار پیشانی در خروجی کالورت

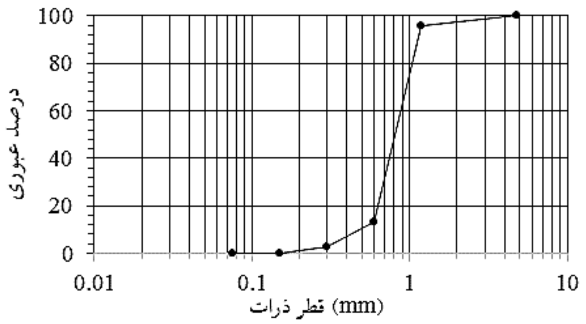
مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در فلومی شیشه‌ای در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز انجام شد. فلوم دارای ابعادی به‌طول ١٦ متر، عرض ۷۰ سانتی‌متر و شیب طولی ۰/۰۰۲۷ می‌باشد که در شکل (۳) نشان داده شده‌است. مدل آزمایشگاهی کالورت در دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای و از جنس پلکسی‌گلاس انتخاب شد. مدل با مقطع مستطیلی دارای ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر، عرض ۲۰ سانتی‌متر، طول ۱۸۰ سانتی‌متر و در دبی ۱۵ لیتر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفت. مدل با مقطع دایره‌ای دارای قطر ۱۰ سانتی‌متر و طول ۱۸۰ سانتی‌متر، در دبی ٦ لیتر بر ثانیه بررسی شد. دیواره‌های جانبی و دیوارهٔ پیشانی از جنس ورق گالوانیزه انتخاب شدند که زاویهٔ نصب دیواره‌های جانبی در بالادست ثابت و برابر ۳۰ درجه به‌منظور کاهش افت ورودی انتخاب شد و در خروجی از ۵ زاویهٔ متغیر ۱۵، ۳۰، ٤٥، ٦۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به خط مرکزی جریان به‌صورت متقارن و مشابه استفاده شد. دیوارهٔ پیشانی نیز به‌صورت عمود بر مقطع کالورت نصب داده شد. مدل کالورت با شیب ۰/۰۰۵ و در فاصلهٔ ۸ متری از بالادست داخل فلوم آزمایشگاهی قرار داده شد. به‌منظور فراهم آوردن ضخامت لازم برای رسوب‌ریزی، کالورت به‌اندازهٔ ۲۰ سانتی‌متر از کف فلوم بالا آورده شد و بستری مصنوعی با قرار دادن صفحاتی در بالادست و پایین‌دست در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر ایجاد شد و بلافاصله در خروجی کالورت به‌طول ۲ متر، عمق ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۷۰ سانتی‌متر رسوبات ماسه‌ای ریخته شد. عمق رسوبات باتوجه به مطالعات آبیدا و همکاران (۱۹۹۱) درنظر گرفته شد. از رسوبات ماسه به قطر متوسط d_{50}= 0.78 mm و چگالی G_S= 2.63 استفاده شد که براساس منحنی دانه‌بندی که در شکل (٤) نشان داده شده‌است انحراف

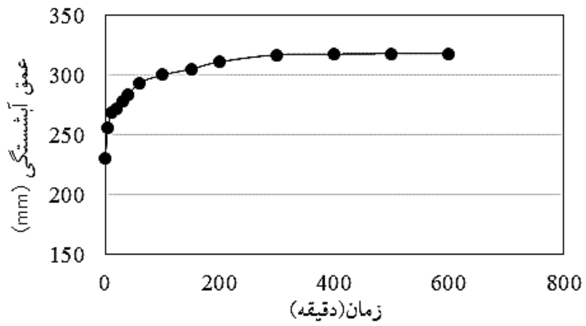
معیار ذرات $\sigma = 1.25$ می‌باشد که نشانگر یکنواخت بودن دانه‌بندی ماسه مطابق با معیار شفاعی‌بجستان (۱۳۹۰) می‌باشد که بیان نمودند درصورتی‌که انحراف معیار ذرات کوچک‌تر از ۱/۳ باشد رسوبات دارای دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد [12]. بنابراین دانه‌بندی ماسه به‌گونه‌ای است که ماکزیمم آبشستگی در آن ایجاد می‌شود. سیستم تأمین آب به‌صورت گردشی بود که امکان تداوم آزمایش‌ها را برای مدت طولانی فراهم می‌کرد. به‌منظور آرام کردن جریان ورودی، در ابتدای فلوم، مخزنی وجود داشت که با باز کردن شیر ورودی آب وارد آن می‌شد و سپس وارد فلوم می‌گردید و پس از توسعه‌یافتگی در فاصلهٔ ۸ متر بالادست وارد کالورت می‌شد. به‌منظور تنظیم عمق جریان از یک سرریز استفاده شد که در انتهای فلوم قرار داشت و برای کنترل دبی از یک دبی‌سنج خودکار الکتریکی با دقت ۰/۵ لیتر بر ثانیه استفاده شد. برای به‌دست‌آوردن زمان آزمایش‌ها از معیار کومار و همکاران (۱۹۹۹) استفاده شد که مدت زمانی که پس از آن در یک بازهٔ سه‌ساعته تغییرات عمق آبشستگی کمتر از یک میلی‌متر باشد به‌عنوان زمان تعادل معرفی کردند [13]. بنابراین آزمایشی بدون محدودیت زمانی و در شرایط هیدرولیکی آزمایش، در کالورت بدون دیوارهٔ جانبی (تست شاهد) انجام گرفت و با ثبت تغییرات آبشستگی در برابر زمان که در شکل (۵) نشان داده شده‌است مدت زمان آزمایش ۵ ساعت به‌دست آمد. باتوجه به این‌که تیپ‌های هیدرولیکی مختلفی درون کالورت اتفاق می‌افتد در ابتدا آزمایش‌هایی صورت گرفت تا مشخص شود که امکان ایجاد کدام یک از تیپ‌ها در شرایط آزمایشگاه وجود دارد. بنابراین در دبی ثابت، ایجاد دو تیپ ۱ و ٤ هیدرولیکی فراهم شد. بنابراین تأثیر تیپ‌های هیدرولیکی ۱ و ٤ همراه با زوایای مختلف دیوارهٔ جانبی در دو کالورت با مقطع مستطیلی و دایره‌ای به‌عنوان متغیرهای آزمایش بر آبشستگی بررسی گردید. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دبی به‌مقدار کم برقرار می‌شد تا شکل رسوبات به‌هم نریزد. پس از آن‌که عمق جریان افزایش می‌یافت مقدار دبی تا مقدار موردنظر اضافه می‌شد. با تنظیم سرریز انتهایی عمق آب موردنظر در ورودی و خروجی کالورت برقرار می‌شد. لازم به ذکر است که در تیپ ٤ هیدرولیکی استغراق دهانهٔ خروجی مبنای اندازه‌گیری بود و تمامی آزمایش‌ها در کالورت مستطیلی با استغراق دهانهٔ خروجی ۱/۳۳ سانتی‌متر و در کالورت دایره‌ای با استغراق دهانهٔ خروجی ۱/۲ سانتی‌متر انجام پذیرفت. در تیپ ۱ هیدرولیکی عمق پایاب ملاک قرار داده شد. در پایان هر آزمایش پروفیل گودال آبشستگی و همچنین میزان رسوب‌گذاری بااستفاده از دستگاه زبری-سنج با دقت ۱ میلی‌متر برداشت می‌شد.



شکل۳ نمایی از فلوم استفاده‌شده



شکل ٤ منحنی دانه‌بندی رسوبات مورد استفاده



شکل۵ منحنی زمان تعادل

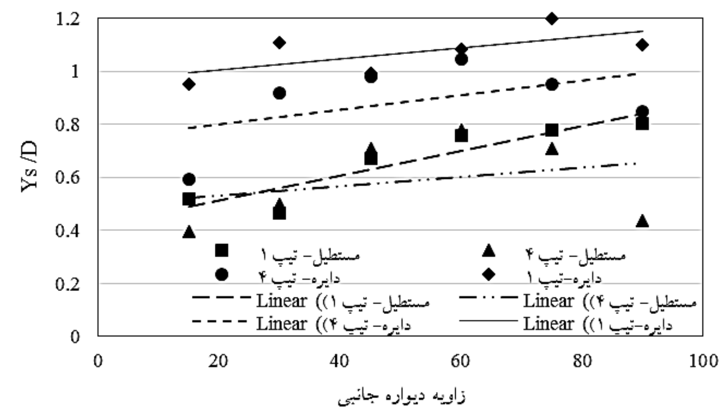
بحث و نتایج

سطح مقطع کالورت از سطح مقطع کانال طبیعی کوچک‌تر است، بنابراین سرعت جریان در کالورت نسبت به کانال بیشتر می‌باشد. انقباض جریان در ورودی و واگرایی جریان در خروجی سبب وقوع آبشستگی موضعی در ورودی و خروجی کالورت می‌شود. مشاهدات نشان می‌دهد که با برخورد جت خروجی از کالورت به بستر در همهٔ زوایای دیوارهٔ جانبی، در شروع آزمایش‌ها آبشستگی با نرخ بیشتری شروع می‌شود که با گذشت زمان ابعاد گودال آبشستگی توسعه پیدا می‌کند و رسوبات شسته‌شده توسط جریان آب در پایین‌دست گودال آبشستگی تجمع می‌یابند؛ سپس نرخ افزایش عمق آبشستگی کاهش پیدا می‌کند زیرا که با توسعهٔ گودال آبشستگی و افزایش عمق آب درون گودال از سرعت جریان درون گودال کاسته می‌شود و تنش برشی واردشده به بستر کاهش می‌یابد، بنابراین نرخ افزایش عمق آبشستگی کاهش پیدا می‌کند. تخمین ماکزیمم عمق و طول گودال آبشستگی در برآورد طول حفاظت و همچنین نوع سازهٔ انرژی‌گیر پایین‌دست ضروری می‌باشد. درادامه به بررسی تأثیر زوایای دیوارهٔ جانبی بر طول و عمق آبشستگی و همچنین بر ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین‌دست گودال آبشستگی پرداخته شده‌است.

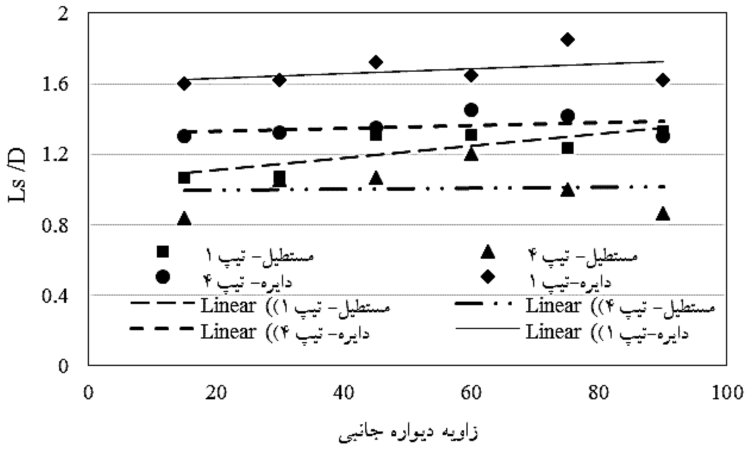
بررسی ماکزیمم عمق گودال آبشستگی. ماکزیمم عمق آبشستگی در هر دو کالورت با مقطع دایره‌ای و مستطیلی در زوایای ۱۵، ۳۰، ٤۵، ٦۰ و ۷۵ درجه در شکل (٦) نشان داده شده‌است و با میزان آبشستگی در حالت بدون دیوارهٔ جانبی (زاویهٔ ۹۰ درجه) مقایسه شده‌است. با مقایسهٔ میزان آبشستگی به‌دست‌آمده در دو مقطع دایره‌ای و مقطع مستطیلی در حالت بدون دیوارهٔ جانبی (تست شاهد) مشاهده می‌شود که در کالورت با مقطع دایره‌ای میزان آبشستگی بیشتری حاصل شده‌است. میزان آبشستگی ارتباط مستقیم با سرعت جریان در خروجی کالورت دارد که این در مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع

مستطیلی بیشتر می‌باشد. در مقطع مستطیلی به‌دلیل چهار گوشه بودن و عریض‌تر بودن شکل مقطع نسبت به دایره-ای، جریان خروجی از کالورت به‌صورت گسترده‌تری توزیع می‌یابد به‌گونه‌ای که جریان به‌صورت سطحی‌تر (عمق کمتر) شکل می‌یابد که دارای سرعت کمتری و درنهایت فرسایش کمتری نسبت به دایره‌ای می‌باشد [14]. همچنین با مقایسهٔ میزان آبشستگی حاصل‌شده در دو تیپ ۱ و ٤ هیدرولیکی مشاهده می‌شود که میزان آبشستگی در خروجی هر دو کالورت دایره‌ای و مستطیلی، در تیپ ۱ هیدرولیکی بیشتر به‌دست آمده‌است. در تیپ ۱ جریان به‌صورت آزاد و با عمق کمتر و سرعت بیشتری از کالورت خارج می‌شود بنابراین میزان آبشستگی بیشتری را ایجاد می‌کند. ساداتی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی عددی الگوی جریان درون کالورت ماکزیمم سرعت را در خروجی مجرا مشاهده کردند [15]. با بررسی تأثیر زوایای دیوارهٔ جانبی بر آبشستگی مشاهده می‌شود که دیوارهٔ جانبی با زاویهٔ ۱۵ درجه نسبت به خط مرکزی جریان، بهترین عملکرد را در کاهش حداکثر عمق آبشستگی نشان داده‌است به‌جز در کالورت با مقطع مستطیلی در تیپ ۱ هیدرولیکی که در زاویهٔ ۳۰ درجه عملکرد بهتری نسبت به بقیهٔ زاویه‌ها در کاهش آبشستگی نشان داده‌است. در تیپ ٤ هیدرولیکی در هر دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای کاربرد دیوارهٔ جانبی در همهٔ زوایا به‌جز در زاویهٔ ۱۵ درجه، تأثیر افزایشی در عمق آبشستگی نشان داده‌است که دیوارهٔ با زاویهٔ ۱۵ درجه باعث کاهش آبشستگی به‌میزان ۳۰٪ در کالورت دایره‌ای و ۱۰٪ در کالورت مستطیلی شده‌است. همچنین زاویهٔ ٦۰ درجه بیشترین تأثیر را در افزایش عمق آبشستگی نشان داده‌است به‌گونه‌ای که در مقطع دایره‌ای باعث افزایش عمق آبشستگی به‌میزان ۳۰٪ و در مقطع مستطیلی باعث افزایش عمق آبشستگی به‌میزان ۸۰٪ شده‌است. در پایین‌دست کالورت و در گوشه‌های خروجی سرعت‌های منفی ایجاد می‌شود که نشانگر تشکیل گردابه‌ها در این نواحی می‌باشد. این گرداب‌ها عامل ایجاد آبشستگی در این ناحیهٔ کالورت می‌باشند [15]، بنابراین زاویهٔ ۱۵ درجه با کاهش عرض ناحیهٔ تشکیل گردابه‌ها نسبت به زوایای دیگر عملکرد بهتری در کاهش آبشستگی نشان داده‌است. در تیپ ۱ هیدرولیکی در مقطع مستطیلی کاربرد دیوارهٔ جانبی در همهٔ زوایا باعث کاهش عمق آبشستگی شده‌است که زاویهٔ ۳۰ درجه با کاهش ٤٦٪ بهترین عملکرد را در کاهش ماکزیمم عمق آبشستگی نشان داده‌است و سپس زاویهٔ ۱۵ درجه با کاهش ۳۵/۳٪ عملکرد خوبی را نشان داده‌است. در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱، روند منظمی مشاهده نمی‌شود ولی با مقایسهٔ تأثیر زاویه‌ها مشاهده می‌شود که در این حالت نیز زاویهٔ ۱۵ درجه با کاهش ۱۳/٦٪ نسبت به بقیهٔ زوایا در کاهش آبشستگی بیشتر مؤثر بوده‌است. بنابراین نوع مقطع کالورت نسبت به زاویهٔ دیوارهٔ جانبی تأثیر بیشتری در میزان آبشستگی نشان داده‌است به‌گونه‌ای که در همهٔ زوایای دیوارهٔ جانبی بیشترین عمق آبشستگی در مقطع دایره‌ای مشاهده می‌شود.

باتوجه به مطالعاتی که توسط محققان صورت گرفته‌است، دیوارهٔ جانبی با زاویهٔ ٤٥ تا ٦۰ درجه (با زاویهٔ بهینهٔ ٤٥ درجه) توصیه شده‌است [11, 16]. زوایای ذکرشده براساس کاهش میزان افت و همچنین بهبود ظرفیت انتقال در مجرای آبی به‌عنوان بهینه پیشنهاد شده-اند. در این پژوهش با بررسی میزان آبشستگی در خروجی کالورت، زاویهٔ ۱۵ و ۳۰ درجه بهینه مشاهده شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که باتوجه به مطالعات کرنوی و همکاران (۲۰۰۷) دیوارهٔ با زاویهٔ ۱۵ و ۳۰ درجه نسبت به بقیهٔ زوایا انطباق بیشتری بر خطوط جریان داشته‌است، بنابراین کمترین میزان آبشستگی را ایجاد نموده‌است. لازم به ذکر می‌باشد که درصدهای آبشستگی محاسبه‌شده نسبت به تست شاهد (زاویهٔ ۹۰ درجه) صورت گرفته‌است.



شکل٦ تغییرات عمق آبشستگی در خروجی کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای



شکل۷ تغییرات طول آبشستگی در خروجی کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای

بررسی طول گودال آبشستگی

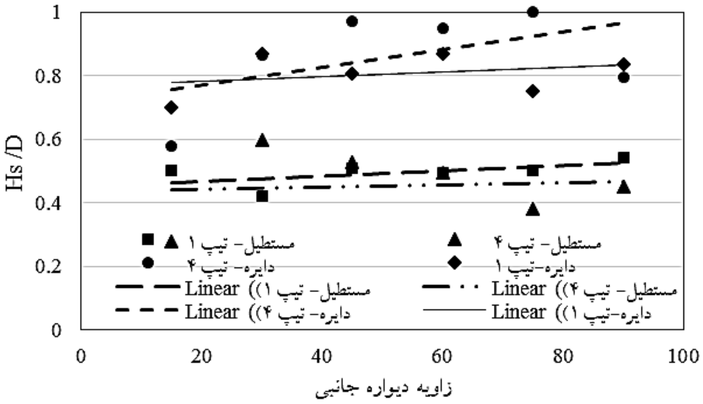
تغییرات طول گودال آبشستگی در زوایای مختلف دیوارۀ جانبی در شکل (۷) مشاهده می‌شود. در کالورت با مقطع دایره‌ای تغییرات طول آبشستگی نسبت به مقطع مستطیلی کمتر است و در هر دو مقطع با افزایش زاویۀ دیوارۀ جانبی از ۱۵ تا ٦۰ درجه، طول آبشستگی افزایش پیدا کرده‌است به‌گونه‌ای که در زاویۀ ٦۰ درجه بیشترین طول آبشستگی اتفاق افتاده‌است. به‌جز در کالورت دایره‌ای در تیپ ۱ ماکزیمم طول آبشستگی در زاویۀ ۷۵ درجه ایجاد شده‌است. در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ در همۀ زوایای دیوارۀ جانبی طول آبشستگی نسبت به تست شاهد کاهش پیدا کرده‌است. ماکزیمم مقادیر طول آبشستگی نسبت به تست شاهد به‌ترتیب در کالورت دایره‌ای تیپ ۱ به‌مقدار ٪١٤/٢، کالورت دایره‌ای تیپ ٤ به‌مقدار ٪۱۱/۵، کالورت مستطیلی تیپ ٤ به‌مقدار ٪٤٤ افزایش می‌باشد. کمترین طول آبشستگی در همۀ حالت‌ها در زاویۀ ۱۵ درجه دیوارۀ جانبی به‌دست آمده‌است. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود کالورت با مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مستطیلی باعث ایجاد طول آبشستگی بیشتری شده‌است که این در تیپ ۱ هیدرولیکی نسبت به تیپ ٤ بیشتر می‌باشد.

ابت و همکاران (۱۹۸۷) با بررسی تأثیر شکل کالورت در الگوی آبشستگی اظهار داشتند که الگوی آبشستگی در حالت مستطیلی به‌طور قابل‌توجهی با الگوی آبشستگی در کالورت دایره‌ای متفاوت می‌باشد [6] که در پژوهش حاضر نیز همین مشاهده شده‌است. در کالورت دایره‌ای به‌دلیل بیشتر بودن سرعت در ناحیۀ خروجی،

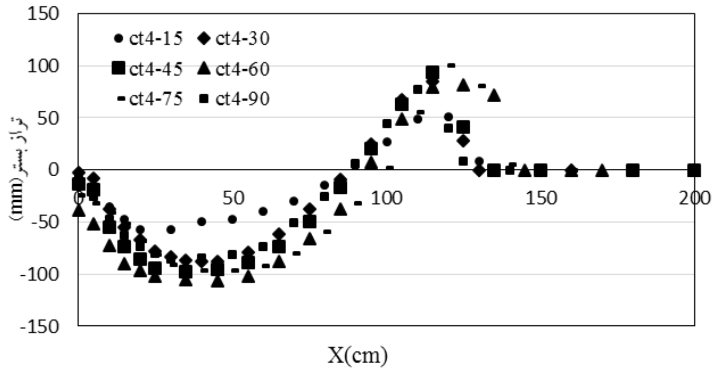
گودال آبشستگی دارای عمق و طول بیشتری درمقایسه با مقطع مستطیلی شده‌است که در تیپ ۱ هیدرولیکی به‌دلیل شکل‌گیری عمق کمتر آب نسبت به تیپ ٤، میزان آبشستگی بیشتر به‌دست آمده‌است. بنابراین کاربرد مقطع مستطیلی در کالورت نسبت به مقطع دایره‌ای ارجحیت دارد.

بررسی ارتفاع رسوب‌گذاری

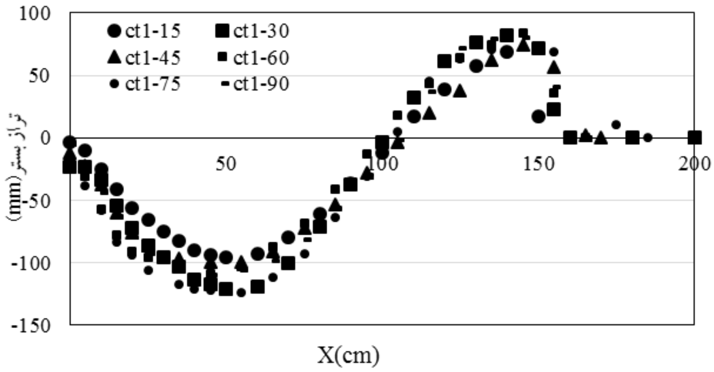
رسوبات جداشده از گودال آبشستگی پس از جابه‌جایی، در نقطه‌ای در پایین‌دست گودال آبشستگی بسته به مقدار سرعت و عمق جریان انباشته می‌شوند. مقایسهٔ حداکثر ارتفاع رسوب‌گذاری در زوایای مختلف دیوارهٔ جانبی در شکل (۸) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشخص است برخلاف ماکزیمم عمق و طول آبشستگی که در کالورت با مقطع دایره‌ای در تیپ ۱ هیدرولیکی رخ داده بود در اینجا ماکزیمم ارتفاع رسوب‌گذاری در تیپ ٤ مقطع دایره‌ای اتفاق افتاده‌است که در زاویهٔ ۷۵ درجه به‌میزان ٪۲۵/۸، باعث افزایش ارتفاع رسوب‌گذاری نسبت به شاهد شده‌است. به‌طور کلی روند ثابت و منظمی بر الگوی رسوب‌گذاری نسبت به تغییر زاویهٔ دیوارهٔ جانبی مشاهده نمی‌شود ولی در همهٔ حالت‌ها، دیوارهٔ جانبی با زاویهٔ ۱۵ درجه به‌دلیل کاهش عمق گودال آبشستگی، ماکزیمم ارتفاع رسوب‌گذاری را کاهش داده‌است به‌گونه‌ای که در کالورت با مقطع دایره‌ای در تیپ ٤ هیدرولیکی به‌میزان ٪۲۷ و در تیپ ۱ به‌میزان ٪۱٦/۲ ارتفاع رسوب‌گذاری کاهش یافته‌است که این در کالورت با مقطع مستطیلی در تیپ ٤، ٪۳۷/۸ و در تیپ ۱ به‌میزان ٪۷/٤ کاهش می‌باشد. مطابق با مشاهدات قبلی در اینجا نیز مقطع دایره‌ای به‌دلیل میزان آبشستگی بیشتر در ناحیهٔ خروجی، نسبت به مقطع مستطیلی باعث رسوب‌گذاری بیشتری در پایین‌دست گودال آبشستگی شده‌است که این در تیپ ٤ هیدرولیکی نسبت به تیپ ۱ بیشتر می‌باشد. نجفی و قدسیان (۱۳۸۳) اظهار داشتند که ارتفاع برآمدگی رسوبات بیشتر از عمق پایاب تأثیر می‌پذیرد و می‌توان بیان کرد که زمانی که عمق پایاب کم می‌باشد رسوبات به‌صورت یکنواخت جلوی گودال آبشستگی پخش و ته‌نشین می‌شوند ولی زمانی که عمق پایاب بیشتر باشد رسوبات به‌صورت تپه‌ای در پایین‌دست گودال آبشستگی تشکیل می‌شوند [17]. بنابراین باتوجه به این‌که عمق پایاب در تیپ ٤ هیدرولیکی بیشتر از تیپ ۱ می‌باشد ارتفاع رسوب‌گذاری در این حالت بیشتر از تیپ ۱ به‌دست آمده‌است. در شکل‌های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نیم‌رخ‌های طولی آبشستگی که بیانگر ماکزیمم عمق آبشستگی، ماکزیمم ارتفاع رسوب‌گذاری و طول گودال آبشستگی می‌باشد در هر دو کالورت دایره‌ای و مستطیلی نسبت به زاویه‌های مختلف دیوارهٔ جانبی نشان داده شده‌است. در شکل‌های ۱۳ و ۱٤ به‌ترتیب خطوط هم‌تراز بستر در تیپ ۱ کالورت دایره‌ای و مستطیلی به‌عنوان نمونه آورده شده‌است و در شکل‌های ۱۵ و ۱٦ پروفیل گودال آبشستگی ایجادشده به‌صورت شماتیک در دو مقطع دایره‌ای و مستطیلی نشان داده شده‌است.



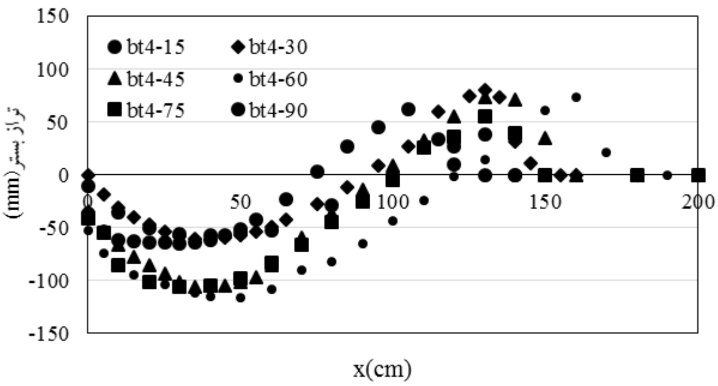
شکل۸ تغییرات ماکزیمم ارتفاع رسوب‌گذاری در پایین‌دست کالورت با دو مقطع مستطیلی و دایره‌ای



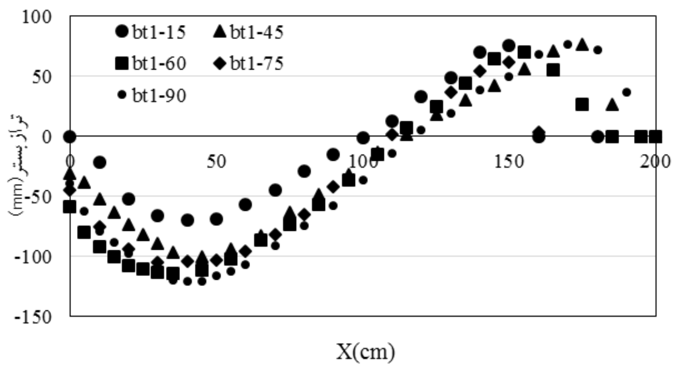
شکل۹ مقایسهٔ نیم‌رخ‌های مختلف آبشستگی در کالورت دایره‌ای، تیپ٤



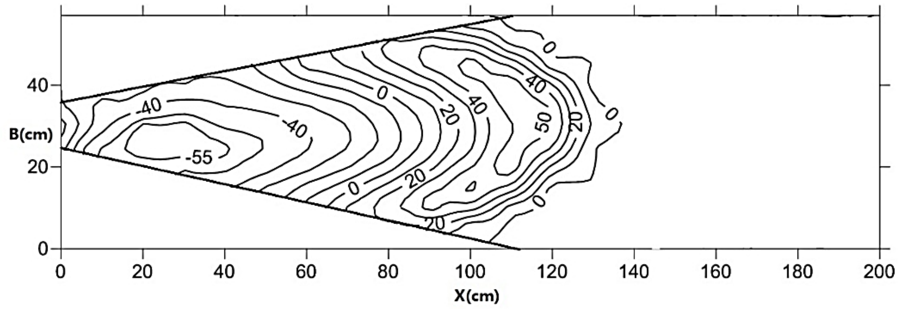
شکل۱۰ مقایسهٔ نیم‌رخ‌های مختلف آبشستگی در کالورت دایره‌ای، تیپ ۱



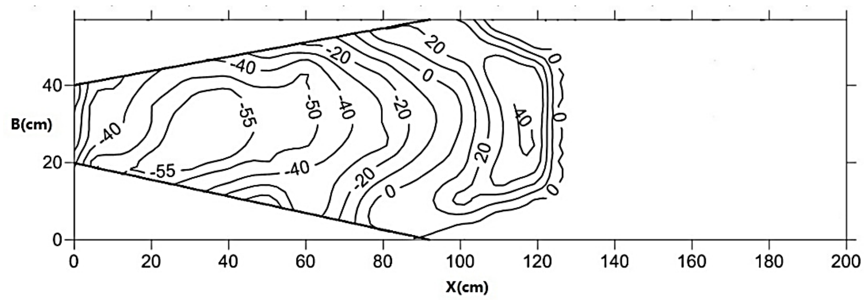
شکل ۱۱ مقایسهٔ نیم‌رخ‌های مختلف آبشستگی در کالورت مستطیلی، تیپ ٤



شکل۱۲ مقایسهٔ نیم‌رخ‌های مختلف آبشستگی در کالورت مستطیلی، تیپ ۱



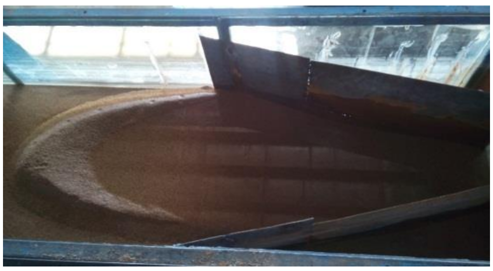
شکل۱۳ خطوط هم‌تراز بستر در کالورت دایره‌ای تیپ ٤ با زاویهٔ ۱۵ درجه



شکل ١٤ خطوط هم‌تراز بستر در کالورت مستطیلی تیپ ٤ با زاویهٔ ۱۵ درجه



شکل۱۵ هندسهٔ چالهٔ آبشستگی پایین‌دست کالورت دایره‌ای



شکل١٦هندسهٔ چالهٔ آبشستگی پایین‌دست کالورت مستطیلی

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که استفاده از دیوارهٔ جانبی در پایین‌دست کالورت در میزان آبشستگی ایجادشده در خروجی کالورت مؤثر می‌باشد و درصورتی‌که با زاویهٔ مناسبی که منطبق با خطوط جریان باشد ساخته شود تأثیر کاهشی در میزان آبشستگی ازنظر عمق و طول آبشستگی و همچنین الگوی رسوب‌گذاری دارد. نتایج زیر از پژوهش حاضر به‌دست آمد:

۱- ابعاد گودال آبشستگی در پایین‌دست کالورت با مقطع دایره‌ای بیشتر از مقطع مستطیلی مشاهده شد، به‌گونه-ای که در مقطع دایره‌ای در تیپ ۱ هیدرولیکی، عمق آبشستگی به‌میزان ۳۵٪ نسبت به مستطیلی افزایش داشته‌است که این در تیپ ٤ هیدرولیکی به‌میزان ۹۵٪ مشاهده شد.

۲- میزان عمق و طول گودال آبشستگی در تیپ ۱ هیدرولیکی نسبت به تیپ ٤ در هر دو کالورت دایره-ای و مستطیلی به‌میزان بیشتری به‌دست آمد.

۳- ارتفاع رسوب‌گذاری در مقطع دایره‌ای نسبت به مقطع مستطیلی بیشتر به‌دست آمد که این در تیپ ٤ هیدرولیکی نسبت به تیپ ۱ به‌میزان بیشتری مشاهده شد.

٤- دیوارهٔ با زاویهٔ ۱۵ درجه باعث کاهش عمق و طول گودال آبشستگی و همچنین ارتفاع رسوبگذاری در پایین‌دست می‌شود که میزان کاهش عمق آبشستگی در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ هیدرولیکی به‌میزان ۳۵/۳٪ نسبت به تست شاهد مشاهده شد. همچنین زاویهٔ ۳۰ با کاهش ٤٦٪ آبشستگی بهترین عملکرد را در کالورت مستطیلی با تیپ ۱ نشان داد.

واژگان لاتین

عمق آب در بالادست کالورت	H_W
ارتفاع کالورت	D
دبی عبوری از کالورت	Q
عرض کالورت	W
عرض کانال پایین‌دست	B
عمق پایاب	y_t
سطح مقطع کالورت	A
شتاب ثقل	g
شعاع هیدرولیکی کالورت	R_H
ماکزیمم عمق آبشستگی	y_S
ماکزیمم عرض آبشستگی	W_S
ماکزیمم طول آبشستگی	L_S
ماکزیمم حجم آبشستگی	V_S
انحراف معیار ذرات	σ
متوسط قطر ذرات	d_{50}

مراجع

۱. حسینی، س.م.، ابریشمی، ج.، «هیدرولیک کانال‌های باز»، چاپ بیست و هفتم، تعداد صفحات: ٦١۳، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۰).

2. Chow, V. T., "Open Channel Hydraulic", Mc Graw. Hill Book Company, Ing, (1959).

3. Yoo, D. H. and Lee, S., "Direct Determination of the Width or Height for a Box Culvert Applying Dimensionless Equations", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 1302-1307, (2012).

4. Zevenbergen, L. W., Arneson, L. A., Hunt, J. H. and Miller, A. C., "Hydraulic Design of Safe Bridge", U.S. Department of Transportation, FHWA-HIF-12-018, (2012).

5. Abida, H. and Townsend, R. D., "Local Scour Downstream of Box-Culvert Outlets", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 425-440, (1991).

6. Abt, S. R., Ruff, J. F., Doehring, F. K. and Donnell, C. A., "Influence of Culvert Shape on Outlet Scour", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 113, No. 3, pp. 393-400, (1987).

7. Abt, S. R., Kolberdanz, R. L. and Mendoza, C., "Unified Culvert Scour Determination", *Journal of*

Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 10, pp. 1475-1479, (1984).

8. Crookston, B. M. and Tullis, B. P. M., "Scour Prevention in Bottomless Arch Culvert", *International Journal of Sediment Research*, Vol. 27(2), pp. 213-225, (2012).

9. Kerenyi, K., Jones, J. S. and Stein, S., "Bottomless Culvert Scour Study: Phase 2 Laboratory Report, FHWA-HRT-07-026, Federal Ighway Administration, D.C, (2007).

10. Thampson, P. L. and Klingore, R. T., "Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels", *Federal Highway Administration*, D.C. FHWA-NHI-06-086, (2006).

11. Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels. US department of transportation-federal highway transportation, *Hydraulic Engineering Circular* No. 14, Third Edition, (2006).

۱۲. شفاعی بجستان، م.، «هیدرولیک رسوب»، چاپ سوم، تعداد صفحات: ٤٧٠، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، (١٣٨٤).

13. Kumar, V., Vittal, N. and Ranga Raju, K. G., "Reduction of Scour around Bridge Piers Using Slots and Collars", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 12, pp. 1302-1305, (1999).

14. Drainage Design Manual., Colorado Department of Transportation, (2017).

۱۵. ساداتی، ف.، هاشمی، م.، زمردیان، س.م.ع، «بررسی عددی الگوی جریان در مجرا و پایین‌دست کالورت در حالت مستغرق»، سیزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تبریز، (۱۳۹۳).

16. Blaisdel, F. W., "The SAF Stilling Basin," U.S. Government Printing Office, (1959).

۱۷. نجفی، ج.، قدسیان، م.، «بررسی آزمایشگاهی ابعاد حفرهٔ آبشستگی پایین‌دست کالورت لوله‌ای»، نشریهٔ دانشکدهٔ فنی، دورهٔ ۳۸، شمارهٔ ۲، صص. ۳۲۹ –۳۳۸، (۱۳۸۳).